榆木蠹蛾生殖行为及性信息素产生与释放节律

杨美红[1], 张金桐[1,*], 刘金龙[1], 荆小院[1], 骆有庆[2], 宗世祥[2], 曹川健[3], 李月华[4]
(1. 山西农业大学化学生态研究所, 山西太谷 030801;
2. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083;
3. 宁夏森林病虫害防治检疫总站, 银川 750004; 4. 宁夏盐池县林木检疫站, 宁夏盐池 751500)

摘要: 通过室内饲养与野外观察榆木蠹蛾 *Holcocerus vicarius* (Walker)成虫的羽化、交尾、产卵行为, 触角电位反应测定处女雌蛾性信息素产生与释放节律, 旨在为榆木蠹蛾性信息素的鉴定和合成奠定基础。结果表明:榆木蠹蛾羽化行为全天可见, 主要集中在 15:00 – 19:00。成虫羽化当日即可交尾, 21:30 – 0:30 进行婚飞和交尾, 交尾高峰出现在晚 23:00 左右, 光期未见交尾。随着日龄的增加, 召唤时间前移并且延长, 2 ~ 3 日龄处女雌蛾召唤时间早于 1 日龄雌蛾, 交尾时间较短; 雌蛾在羽化 1 d 后达到性成熟, 2 日龄雌蛾交尾百分率最高, 达 41.8%。雌蛾将产卵器伸出寻找缝隙处产卵, 分多处产卵, 雌虫最高产卵量达 720 粒, 最低产卵量为 105 粒, 卵期为 12 ~ 22 d 不等, 孵化率为 72% ~ 88%。羽化当晚的雌蛾体内性信息素含量较低, 第 2 天最高, 以后逐日下降; 2 日龄榆木蠹蛾处女雌蛾性信息素的产生量从晚 17:00 起逐渐增加, 21:30 – 22:00 时最高, 22:00 后逐渐减小。雄蛾触角电位反应在 22:30 最强。21:30 – 23:00 是雌蛾产生和释放性信息素的高峰期。榆木蠹蛾的羽化、交尾存在一定的时辰节律, 通过处女雌蛾的野外诱集试验证实了性信息素释放与交配行为在时辰节律上的一致性。

关键词: 榆木蠹蛾; 生殖行为; 羽化; 交尾; 性信息素; 时辰节律
中图分类号: Q965　　**文献标识号**: A　　**文章编号**:0454-6296(2010)11-1273-08

Reproductive behavior and circadian rhythm of sex pheromone production and release of *Holcocerus vicarius* (Walker) (Lepidoptera: Cossidae)

YANG Mei-Hong[1], ZHANG Jin-Tong[1,*], LIU Jin-Long[1], JING Xiao-Yuan[1], LUO You-Qing[2], ZONG Shi-Xiang[2], CAO Chuan-Jian[3], LI Yue-Hua[4] (1. Institute of Chemical Ecology, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China; 2. The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Forest Pest Control and Quarantine Station of Ningxia, Yinchuan 750004, China; 4. Station of Forest Quarantine of Yanchi County, Yanchi, Ningxia 751500, China)

Abstract: To establish the basis for identifying and synthesizing the sex pheromone of *Holcocerus vicarius* (Walker), the eclosion, mating and oviposition of *H. vicarius* adults were studied by means of observations and experiments both in the fields and laboratory. The circadian rhythm of sex pheromone production and release of *H. vicarius* was studied by means of electroantennogram (EAG) response. The results showed that the eclosion of *H. vicarius* happened throughout the day, especially from 15:00 to 19:00. Mating behavior started on the 1st night after the eclosion and the nuptial flight and mating took place from 21:30 to 0:30. The peak of mating occurred at 23:00 or so. The mating behavior was not observed during the photophase. Calling varied with the age of female, with older (2 to 3-day-old) virgin females calling earlier and for longer duration than younger (1-day-old) females. They had shorter time of mating when they were young. Females became sex mature one day later. The percentage of mating of 2-day-old was the highest (41.8%). The females searched the gap with ovipositor, and then began to oviposit. They oviposited at various places. The maximum of oviposition was up to 720 eggs, and the minimum was 105 eggs. The egg stage lasted 12 – 22 d. The hatch rate was from 72% to 88%. The amount of pheromone in the gland was relatively low on the first night after the eclosion, with a peak during the second night, and then decreased gradually when they aged. The amount of pheromone of 2-day-old virgin females began to increase gradually

基金项目: 国家"十一五"科技支撑计划项目(2006BAD08A10); 国家自然科学基金项目(31070581)
作者简介: 杨美红, 女, 1970 年生, 山西太谷人, 博士研究生, 副教授, 主要从事化学生态学研究, E-mail: zxymh123@163.com
* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhangjintong@126.com
收稿日期 Received: 2010-04-02; 接受日期 Accepted: 2010-10-13

post 17:00, with the peak between 21:30 and 22:00, and then decreased gradually post 22:00. EAG response was the greatest at 22:30. The peak of sex pheromone production and release of *H. vicarius* occurred between 21:30 and 23:00. There was a circadian rhythm in the eclosion and mating of adults. The sex pheromone release and mating behavior of *H. vicarius* were synchronized, which was confirmed by tests of using virgin females to trap males in the fields.

Key words: *Holcocerus vicarius*; reproductive behavior; eclosion; mating; sex pheromone; circadian rhythm

榆木蠹蛾 *Holcocerus vicarius* (Walker)属于鳞翅目木蠹蛾科，又名柳干木蠹蛾、柳乌蠹蛾、大褐木蠹蛾，分布于中国北方和西南等地，俄罗斯、朝鲜、越南和日本等也有分布，是中国阔叶园林树木的重要蛀干害虫，是2008年国家林业局发布的"林业危险性有害生物名单"中的有害生物之一(国家林业局防止外来林业有害生物管理办公室，2008)。该虫主要危害白榆 *Ulmus pumila* L.，其次危害刺槐 *Robinia pseudoacacia* L.，麻栎 *Quercus acutissima* Carruth.，金银花 *Lonicera japonica* Thunb.，花椒 *Zanthoxylum bungeanum*，柳树 *Salix babylonica*，杨树 *Populus* spp.，核桃 *Juglans regia* 和苹果 *Malus pumila* Mill.（萧刚柔，1992)。幼虫钻蛀寄主的根、茎和韧皮部进行危害，破坏输导组织，被称为"心腹之患"。树皮上留下由红色虫粪堵塞的粗大蛀孔，树液从孔中流出，为害严重时使树势衰弱甚至死亡。

2006年调查宁夏引黄灌区和干旱沙区榆木蠹蛾危害林木面积就超过2.5万 hm^2，对退耕还林和农田林网建设成果构成严重威胁，正在上升为该地区的主要优势害虫(高同义等，2008)。目前就榆木蠹蛾生态学特性及生物学特性(李冰等，2005；郝小燕等，2006；高同义等，2008)、化学防治和生物防治(方德齐等，1992)曾有过报道，但关于榆木蠹蛾的生殖行为及性信息素产生与释放节律研究在国内外未见报道。利用昆虫性信息素防治有害昆虫是目前生态防治的途径之一，能否对其进行生态控制是直接关系到农林经济发展和人体健康的重大问题。因此，本试验通过对榆木蠹蛾羽化和交尾的观察，性信息素提取、触角电位测定和田间诱蛾试验对榆木蠹蛾性信息素产生和释放节律的研究，了解榆木蠹蛾成虫的生殖行为，获得昆虫在繁殖过程中性行为反应、化学通讯的有关信息，为下一步对榆木蠹蛾性信息素组分的提取、分离、鉴定及利用性信息素对成虫进行准确的监测以及林间大量诱捕和干扰交配提供可靠的依据。

1 材料和方法

1.1 供试虫源及饲养

供试榆木蠹蛾 *H. vicarius* 的老熟幼虫挖自宁夏回族自治区盐池县机械化林场高沙窝分厂，带回室内饲养于装有潮湿细沙的养虫笼(60 cm×45 cm×30 cm)中，以寄主植物白榆树干饲喂，直到老熟幼虫在潮湿细沙中化蛹，待其羽化。羽化后按性别和虫龄(从羽化到第1个光期结束为1日龄，依此类推)将其分别置于纱笼(60 cm×60 cm×60 cm)，以10%蜂蜜水饲喂。

1.2 羽化行为观察

室内观察从第一头成虫羽化后，每天转移出羽化的榆木蠹蛾，在14:00－20:00(预试验中发现成虫羽化多集中在下午15:00－19:00之间)每隔1 h观察记录一次羽化头数，其余时间每隔3 h记录一次羽化头数，羽化过程连续观察24 h($n=72$)，直到细沙中所有的蛹羽化完为止。试验重复3次，查蛹共计950个。

1.3 成虫性行为活动节律

将当日羽化的成虫雌雄20对置于同一纱笼(90 cm×90 cm×90 cm)中，设3个重复，共60对置于通风干燥处观察其交配行为。观察时间在20:30－5:30(预试验中发现光照期间成虫没有交尾行为)，用红布包裹手电筒进行观察，记录每对成虫交尾开始和结束的时间。从羽化当天一直观察到成虫死亡。

1.4 产卵以及卵期和幼虫孵化率观察

将已经交尾的雌成虫($n=53$)单个置于小纱笼(25 cm×25 cm×30 cm)中每隔1 h观察统计产卵情况、卵期和幼虫孵化率。

1.5 成虫生殖行为野外观察

野外观察在盐池县机械化林场高沙窝分厂榆树林中进行，2009年6月8日到6月22日每天下午14:00－0:00观察榆树周围沙土上成虫羽化、交尾及产卵情况。固定观察30棵受害榆树，15:00－19:00观察记录羽化行为和时间，20:30－0:00用

红布包裹手电筒观察记录成虫交尾行为和时间、地点，雌蛾产卵行为、在树上产卵部位及数量。

1.6　性信息素提取与释放节律测定

1.6.1　腺体提取：利用扫描电镜、透射电镜对腹尖表面形态及组织切片进行观察，确定性信息素分泌腺位于腹尖末端 8～9 节之间的节间膜上，用手轻挤处女雌蛾腹部模拟召唤状，迫使性腺暴露，用手术刀剪下性信息素腺体，用重蒸正己烷提取 40 min，提取液经 N_2 小心浓缩至一定体积后转移到另一洁净细玻璃管中，－20℃保存待用。

1.6.2　空气收集：将一头处女雌蛾按不同时辰放入一个具有磨口玻璃塞的 25 mL 洁净玻璃瓶中，并在瓶口部放一细丝以保障瓶内蛾的正常呼吸，并保证性信息素尽量少向瓶外释放，15 min 后立即取出雌蛾，迅速向玻璃瓶中加入少量重蒸正己烷，加塞后充分振摇，提取液经 N_2 小心浓缩至一定体积后转移到另一洁净细玻璃管中，封口，－20℃保存待用。

1.6.3　触角电位（electroantennogram，EAG）试验：触角电位测定仪由荷兰 Syntech 公司生产。包括微电极放大器，Syntech UN-06 直流/交流放大器，Syntech CS-05 刺激放大器，Syntech Mp-15 微动操作仪，连续气体流量为 124 mL/min，刺激气体流量为 20 mL/min，刺激时间为 0.1 s，刺激间隔 30～60 s。

试验时用眼科剪刀将 2 日龄未交尾的雄蛾触角从基部剪下，并用单面刀片快速切下触角末端两节，用充满生理液（NaCl 7.50 g，$CaCl_2$ 0.21 g，KCl 0.35 g，$NaHCO_3$ 0.20 g 溶于 1 L 蒸馏水中）的玻璃电极套在触角的两端进行 EAG 测定（张金桐和孟宪佐，2000）。刺激顺序是从低浓度到高浓度，为了消除触角适应而导致的偏差，每测定一样品，前后都进行相应的空白测定，20 μL 正己烷为空白对照，取两对照的平均值作为该样品的对照值，每次测定值减去空白，得到触角对刺激物的净反应值。每头雄蛾只用一根触角，一根触角只用于一种样品，每个处理浓度在同一根触角上平行测定 3 次，取测定值的平均值，每个处理浓度使用 6 根触角。

1.6.4　性信息素的剂量反应曲线的确定：采用上文 1.6.1 节方法进行腺体提取。于晚上 21:30（处于召唤状态）将 2 日龄的 15 头处女雌蛾的腺体摘取，浸入 300 μL 重蒸正己烷中，40 min 后取出腺体，溶液浓度为 1 FE/20 μL（FE = 雌当量 female equivalent），以此为母液依次配制 10，1，10^{-1}，10^{-2}，10^{-3}，10^{-4}，10^{-5}FE/20 μL 的溶液。采用上文1.6.3方法进行不同剂量处理的 EAG 试验。每个处理进样量为 20 μL。

1.6.5　性信息素的产生与蛾龄的关系：分别取 1～5 日龄 10 头处女雌蛾在晚上 21∶30 进行腺体提取，试验浓度为 1 FE/20 μL，以正己烷为对照进行 EAG 反应。

1.6.6　雌蛾性信息素产生和释放的时辰节律：分别取 2 日龄处女雌蛾 10 头于 17:00，19:00，21:00，21:30，22:00，22:30，23:00，23:30，0:00，1:00，2:00 进行腺体提取（方法见 1.6.1）和空气收集（方法见 1.6.2）性信息素，试验浓度为 1 FE/20 μL，以正己烷为对照进行 EAG 反应。

1.7　处女雌蛾野外诱蛾试验

采用三角形诱捕器，材料为白色塑料中空板，边长 30 cm，棱长 40 cm，底部涂有粘虫胶，分别将 1 头 1～6 日龄的处女雌蛾放入小纱笼（8 cm×8 cm×8 cm）中，并将其悬挂于诱捕器，距离胶面 1～2 cm，设 6 个重复，置于宁夏回族自治区盐池县机械化林场高沙窝分厂的榆树林中，以无蛾诱捕器做对照，悬挂在距地面高度为 2 m 左右的榆树上，从 18:00 到次日凌晨 1:00 每小时记录诱蛾数量。诱捕器间隔 20 m，随机分布。

1.8　数据统计与处理

采用 SPSS 13.0 统计软件对数据进行分析处理，并用 Duncan 氏新复极差法检验差异性。

2　结果与分析

2.1　榆木蠹蛾羽化行为

羽化前，茧内的蛹靠背部刺列钩住茧内侧做收缩运动，逐渐钻出细沙，用头部顶破虫茧，待头部蛹壳开裂，成虫从蛹壳中爬出，并将蛹壳大部分或全部带出虫茧。若不是头部先出蛹壳，该虫不能正常羽化。其羽化行为全天可见，15:00－19:00 比较集中（表 1），羽化数量极显著高于其他时段（$P<0.01$）。刚羽化的成虫双翅潮湿且折叠，微向腹侧弯曲，翅面呈皱缩状，整个背外露，随后翅慢慢展开，双翅合拢成屋脊状立于背上，再经过 5～10 min 后将翅水平放下，羽化完成，羽化历期为 11～15 min。一般雌蛾个体比雄蛾大。刚羽化的成虫并不马上活动，20 min～2 h 后开始向四处爬行，然后静伏，其间常伴随从尾部喷出一股红褐色的液体，雌雄均有此现象。白天成虫静伏不动，到天黑（20:30）后开始飞翔，具有趋光性。

表 1 榆木蠹蛾室内羽化行为

Table 1 Behavior of eclosion of *Holcocerus vicarius* in the laboratory

时间 Time	羽化数量(头) Number of eclosed individuals	羽化历期(min) Duration of eclosion
14:01 - 15:00	25.22 ± 3.23 Ccd	13.91 ± 2.27
15:01 - 16:00	140.17 ± 8.74 Aa	12.75 ± 4.12
16:01 - 17:00	141.50 ± 10.24 Aa	14.38 ± 1.80
17:01 - 18:00	157.76 ± 6.64 Aa	15.24 ± 2.21
18:01 - 19:00	146.28 ± 11.92 Aa	11.43 ± 1.80
19:01 - 20:00	45.31 ± 4.75 Bb	13.38 ± 2.41
20:01 - 23:00	43.26 ± 1.24 Bb	12.97 ± 1.62
23:01 - 2:00	26.18 ± 5.14 Ccd	13.20 ± 3.69
2:01 - 5:00	32.63 ± 3.30 Cc	14.62 ± 3.27
5:01 - 8:00	21.78 ± 4.72 Cd	12.33 ± 3.26
8:01 - 11:00	18.56 ± 3.81 Cd	11.18 ± 1.74
11:01 - 14:00	18.24 ± 1.93 Cd	13.62 ± 1.43

表中数据为平均值 ± 标准差，同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)；不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)；下同。The data in the table are mean ± *SD*. Data in a column with different small letters are significantly different ($P<0.05$), while those with different capital letters are extremely significantly different ($P<0.01$). The same below.

2.2 榆木蠹蛾成虫性行为活动节律

野外观察发现榆木蠹蛾成虫羽化当晚即可交尾，21:30 - 0:30 进行婚飞和交尾，交尾高峰出现在晚 23:00 左右，光期未见交尾。交尾前，雄虫较雌虫更为兴奋，触角快速的上下震动，频率明显高于雌虫，同时振翅。雌蛾求偶时两翅微向两侧外伸，后腹末端经几次伸缩，露出黄色产卵器及性腺体，性腺体和身体成 45°角左右，如果没交尾此状态可保持 1 ~ 2 h。当雄蛾接受到雌蛾释放的性信息素时，便定向飞往雌蛾，在其周围振翅、爬行，高度兴奋，不时伸出抱握器，不断用翅膀和身体接触雌虫，而雌蛾则被动地移动身体。交配时雌、雄蛾多数呈“一”字形，有的为“人”字形，历时 15 ~ 60 min。野外成虫交尾都在顺风的树枝或树干上。

室内成虫交尾一般选择在纱窗网上进行，交尾时雌雄虫均静止不动，此时若人为将正在交尾的雌雄虫转移到新的观察环境中，甚至有强光环境中也不会干扰其交尾行为。交尾结束后，雌雄虫分开，雌雄虫均静伏不动，过 20 ~ 60 min 后，雄虫飞离交尾场所，雌蛾仍停留在原地，或进行近距离爬行。雌雄交尾后均变得不活跃，室内雌雄蛾都未观察到多次交尾现象。

室内榆木蠹蛾成虫交尾发生在 21:30 - 0:30，高峰出现在 23:00 左右(图 1)。由表 2 可以看出，室内羽化成虫当晚即可交尾，但交尾百分率极显著低于 2 和 3 日龄($P<0.01$)，说明雌蛾在羽化 1 d 后才能达到性成熟，2 日龄具有最强的交尾能力，未交尾的 2，3，4，5，6 日龄雌蛾召唤时间早于 1 日龄雌蛾，且召唤时间长，2 和 3 日龄蛾交配时间极显著短于其他日龄($P<0.01$)，4 和 5 日龄交尾时间最长，6 日龄后不再具有交尾能力，有些成虫已经死亡。

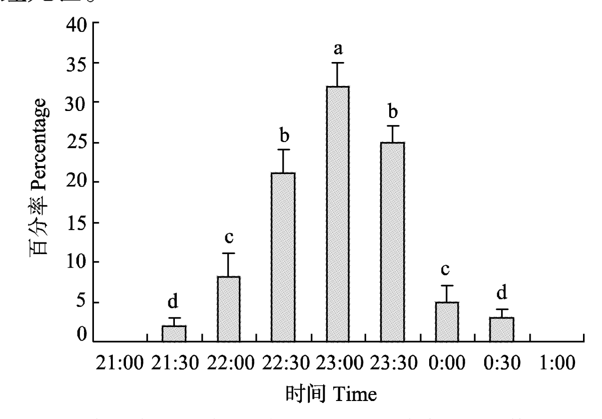


图 1 榆木蠹蛾室内不同时间交尾百分率(平均值 ± *SD*)

Fig. 1 The percentage (mean ± *SD*) of *Holcocerus vicarius* mating in laboratory at different time

柱子上方标有不同字母表示差异显著($P<0.05$)，下同。Columns with different letters above are significantly different ($P<0.05$). The same below.

表 2　不同日龄榆木蠹蛾成虫室内交尾观察

Table 2　Observation of mating behavior of *Holcocerus vicarius* at different ages in laboratory

日龄(d) Age	召唤时间 Time of calling	交尾百分率 Percentage of mating	交尾平均时间(min) Average time of mating
1	21:52 - 0:45	10.92 ± 0.31 Cc	38.52 ± 2.01 Bb
2	21:32 - 0:40	41.81 ± 1.14 Aa	15.43 ± 1.83 Cc
3	21:33 - 0:55	32.74 ± 1.70 Bb	15.40 ± 2.71 Cc
4	21:06 - 1:25	12.73 ± 0.46 Cc	58.65 ± 1.42 Aa
5	21:09 - 1:30	1.80 ± 0.15 Dd	60.24 ± 4.22 Aa
6	21:00 - 1:23	0 Ee	0 Dd

2.3　榆木蠹蛾的产卵行为及幼虫孵化率

雌雄蛾交尾后，均静伏不动几小时到十几小时不等，之后雄蛾开始活动，但未见远距离飞翔。雌蛾直到产卵才开始挪动，由于雌成虫体内怀有大量的卵，其飞翔能力很弱，当天或第 2 天开始产卵，林间调查发现卵多产于榆树干伤疤及树皮裂缝，产卵时先从树干基部开始，逐渐向上，在树干的不同位置将卵分堆产下。产卵时雌蛾将产卵器伸出然后产卵，雌虫最高产卵量可达 720 粒，最低产卵量为 105 粒。在实验室小纱笼中，雌蛾将卵产在纱窗和木头棱的缝隙处，也是分多处产卵，卵附着在木头棱或缝隙处，附着力极强，卵壳硬实，人为破毁的卵中会流出牛奶样液体。卵期为 12.27 ~ 22.17 d 不等，孵化率为 72.02% ~ 88.46%(表 3)。

表 3　榆木蠹蛾产卵数以及卵期和幼虫孵化率

Table 3　Number of eggs laid, egg stage and the hatch rate of *Holcocerus vicarius*

产卵日期(日/月) Date of oviposition (day/month)	产卵数(粒) Number of eggs laid	卵期(d) Egg stage	孵化率(%) Hatch rate
5/6	720.30 ± 1.42	15.23 ± 2.24	77.32
8/6	238.31 ± 1.90	17.20 ± 3.63	87.21
11/6	105.17 ± 1.27	21.59 ± 1.35	88.46
14/6	408.39 ± 1.43	12.27 ± 1.25	72.02
17/6	501.08 ± 1.42	22.17 ± 1.40	86.57
20/6	269.01 ± 1.44	12.27 ± 0.24	83.34
23/6	520.45 ± 1.60	13.72 ± 1.01	84.02

2.4　榆木蠹蛾性信息素产生与释放节律

2.4.1　雄蛾对性信息素提取物的 EAG 反应：从图 2 可看出，2 日龄雄蛾对 2 日龄处女雌蛾性信息素的 EAG 反应浓度为 10^{-4}FE/20 μL，但反应值很小，随刺激浓度增加反应值增大，1 FE /20 μL 反应值显著大于 10^{-1}FE /20 μL($P < 0.05$)，10 FE/20 μL 反应最强，但和 1 FE /20 μL 差异不显著($P > 0.05$)，说明 1 FE 已经达到饱和阈值，因此选取 1 FE的性信息素提取物作为标准刺激浓度。

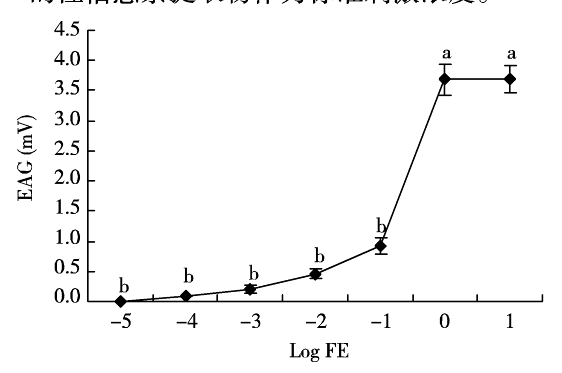


图 2　榆木蠹蛾雄蛾对不同浓度雌蛾性信息素的 EAG 反应

Fig. 2　EAG response of male *Holcocerus vicarius* to female sex pheromone at different concentrations

数据(平均值 ± *SD*)上方标注不同字母表示差异显著。Data (mean ± *SD*) with different letters above are significantly different ($P < 0.05$).

2.4.2　性信息素的产生与蛾龄的关系：由图 3 可知，羽化当晚的雌蛾体内性信息素含量较低，2 日龄最高，显著高于其他日龄($P < 0.05$)，以后逐日下降，说明日龄对榆木蠹蛾性信息素含量影响很大。这一结果与 1，3，4 和 5 日龄雌蛾诱蛾量较小，而 2 日龄雌蛾诱蛾量最高(37.0%)的野外试验结果是一致的。

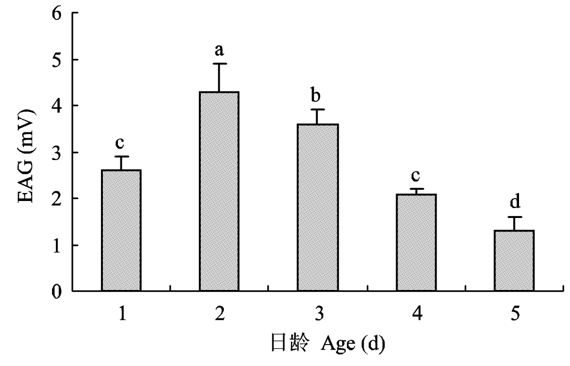


图 3　榆木蠹蛾雄蛾对不同日龄雌蛾腺体提取物的 EAG 反应

Fig. 3　The EAG response of male *Holcocerus vicarius* to crude extract of female glands at different ages

2.4.3　雌蛾性信息素产生和释放的时辰节律

从图 4 可以看出，榆木蠹蛾性信息素的产生量从晚 17:00 起逐渐增加，22:00 后逐渐减小，21:30 - 22:00 时最高，显著高于其他时刻($P < 0.05$)。

用空气收集法收集的性信息素进行测定时，雄蛾 EAG 反应在 22:30 最强，说明 21:30－23:00 是雌蛾产生和释放性信息素的高峰期。

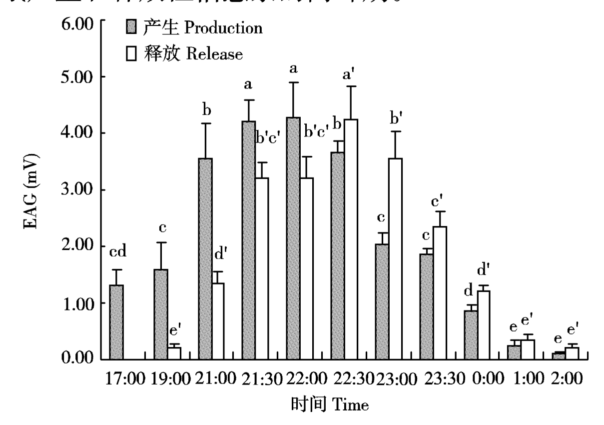


图 4 榆木蠹蛾性信息素产生和释放的时辰节律

Fig. 4 Circadian rhythm of sex pheromone production and release of *Holcocerus vicarius*

相同类型柱子上端标注不同字母表示差异显著。Columns of the same type with different letters above are significantly different ($P < 0.05$).

2.5 处女雌蛾林间诱蛾试验

不同日龄的榆木蠹蛾处女雌蛾在同一天中诱蛾数量是不同的(表 4)，2 日龄处女雌蛾诱蛾数极显著高于 1 日龄和 3 日龄($P < 0.01$)，4 日龄雌蛾诱蛾活性极显著降低($P < 0.01$)，5、6 日龄雌蛾几乎没有诱蛾活性。同日龄榆木蠹处女雌蛾在一天中不同时间引诱的雄蛾的数量也不同(表 5)，雌蛾诱蛾高峰在晚上 22:00 左右，21:00－23:00 诱蛾占总量的 73.10%，说明榆木蠹蛾雌、雄蛾的求偶活动主要发生在 21:00－23:00，与雌蛾性信息素释放的节律是一致的。

表 4 不同日龄单头榆木蠹处女雌蛾对雄蛾引诱数

Table 4 Number of male moths of *Holcocerus vicarius* trapped by virgin females of different age

日龄(d) Age	处女蛾诱蛾数 Number of male moths trapped	对照 Control
1	5.74 ± 0.16 Bb	0
2	7.88 ± 1.85 Aa	0
3	4.30 ± 1.04 Bc	0
4	2.50 ± 0.38 Cd	0
5	0.90 ± 0.39 De	0
6	0 Ef	0

表 5 单头榆木蠹处女雌蛾在一天中不同时间对雄蛾引诱数量的比较

Table 5 Comparison of male moths of *Holcocerus vicarius* trapped by a virgin female during different time of the day in the field

时间 Time	处女蛾诱蛾数 Number of male moths trapped	对照 Control
18:00－19:00	0	0
19:01－20:00	0	0
20:01－21:00	1.62 ± 0.38	0
21:01－22:00	7.70 ± 1.34	0
22:01－23:00	7.88 ± 2.30	0
23:01－0:00	3.58 ± 1.09	0
0:01－1:00	0.54 ± 0.13	0

3 讨论

野外诱蛾试验表明榆木蠹蛾雌蛾性信息素释放和求偶行为在一天中的不同时间有差异，榆木蠹蛾在 21:00－23:00 达到诱蛾高峰，其原因是鳞翅目昆虫的生殖活性不是出现在全天，而是限制在特定时期的特定时辰范围内(汪新文和刘孟英，1997)，大部分雌蛾求偶行为和释放性信息素是有一定时辰节律的，许多昆虫如舞毒蛾 *Lymantria dispar* (Giebultowicz *et al*., 1992)、苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (Castrovillo and Carde, 1979)、枣镰翅小卷蛾 *Ancylis sativa* Liu (韩桂彪等，1999)、沙棘木蠹蛾 *Holcocerus hippophaecolus* (宗世祥等，2006)和豆野螟 *Maruca vitrata* (Fabricius) (陆鹏飞等，2007)等的求偶行为也是仅在一天的某一时间段。这可能是其性信息素的产生、求偶和交尾行为都受光周期等的影响。

从不同日龄的处女雌蛾在同一天诱集雄蛾的数量分析，榆木蠹蛾羽化当天就具有求偶和交尾行为，2 日龄处女雌蛾诱蛾数量显著大于其他日龄，说明羽化 1 d 后达到性成熟；从雄蛾对雌蛾腺体粗提物的 EAG 反应数据可以看出，2 日龄处女雌蛾体内性信息素含量最高，说明雌蛾性信息素释放和求偶行为受日龄的影响(Webster and Carde, 1982)，这种影响主要反映在性信息素腺体的发育成熟程度，同张金桐和孟宪佐(2001)对小木蠹蛾 *Holcocerus insularis* Staudinger 进行的试验结果一致。

本试验中发现，雌蛾一生未见第 2 次交尾，这可能是交配后雌虫腺体中性信息素的产生受到永久性抑制，其求偶和交配能力将不再恢复(Giebultowicz *et al.*，1991；董双林和杜家纬，2002)。

未交尾的 2 和 3 日龄雌蛾召唤时间早于 1 日龄雌蛾。Zarbin 等(2007)研究发现，*Lonomia obliqua* 不同日龄的处女雌蛾召唤时间不同，随着虫龄的增加，生殖行为逐渐提前；Swier 等(1977)认为老龄处女雌蛾通过求偶行为的提前来增加与幼龄处女蛾的竞争能力，老龄处女雌蛾的召唤时间延长，这一点和 Mazor 和 Dunkelblum (2005)对 *Autographa gamma* 和 *Cornutiplusia circumflexa* 的研究结果一致，通过召唤时间的提前和延长达到提高对雄蛾引诱机率的目的。2 和 3 日龄蛾交配时间较短，1，4 和 5 日龄交尾时间较长，说明榆木蠹蛾通过延长交尾时间来获得更多成功交尾的机会。

从雌蛾的性腺提取物以及空气收集性信息素产生的 EAG 反应可以看出产生和释放性信息素具有明显的时辰节律。榆木蠹蛾性信息素的产生早于释放，与 Delisle 和 McNeil (1987)对 *Pseudaletia unipuncta*、Snir 等(1986)对 *Chrisodeixis chalcites* 研究性信息素的产生早于雌蛾的召唤结果相似。从 2 日龄雌蛾腺体提取和空气收集性信息素的 EAG 反应可以看出，21:30 – 23:00 是雌蛾产生和释放性信息素的高峰期，与野外诱蛾结果一致。

参 考 文 献 (References)

Castrovillo PJ, Carde RT, 1979. Environmental regulation of female calling and male pheromone response periodicities in the codling moth (*Laspeyresia pomonella*). *J. Insect Physiol.*, 25: 659 – 667.

Delisle J, McNeil JN, 1987. Calling behavior and pheromone titer of the true armyworm *Pseudaletia unipuncta* (Haw.) (Lepidoptera: Noctuidae) under different temperature and photoperiodic conditions. *J. Insect Physiol.*, 33: 315 – 324.

Dong SL, Du JW, 2002. Effects of mating experience and temperature on sex pheromone production of beet armyworm, *Spodoptera exigua*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 13(12): 1633 – 1636. [董双林，杜家纬，2002. 交配和温度对甜菜夜蛾(*Spodoptera exigua*)雌蛾性信息素产生的影响. 应用生态学报，13(12): 1633 – 1636]

Fang DQ, Chen SL, Li XC, 1992. The status of studies on Cossidae in China. *Shaanxi Forest Science and Technology*, (2): 29 – 35. [方德齐，陈树良，李宪臣，1992. 中国木蠹蛾研究进展情况. 陕西林业科技，(2): 29 – 35]

Gao TY, Sun P, Lang XR, 2008. Study on bionomics characteristic and integration control technology of *Holcocerus vicarius* (Walker). *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, (5): 19 – 20. [高同义，孙普，郎杏茹，2008. 榆树木蠹蛾生态学特性及综合防控技术研究. 宁夏农林科技，(5): 19 – 20]

Giebultowicz JM, Raina AK, Uebel EC, Ridgway RL, 1991. Two-step regulation of sex pheromone decline in mated gypsy moth females. *J. Arch. Insect Biochem. Physiol.*, 16: 95 – 105.

Giebultowicz JM, Webb RE, Raina AK, Ridgway RL, 1992. Effects of temperature and age on daily changes in pheromone titer in laboratory-reared and wild gypsy moths, (Lepidoptera: Lymantriidae). *Environ. Entomol.*, 21: 822 – 826.

Han GB, Du JW, Hu C, Li LC, 1999. Effects of environmental temperature and photoperiodic changes on calling behaviour and sex pheromone release in *Ancylis sativa* Liu. *Scientia Silvae Sinicae*, 35(2): 75 – 81. [韩桂彪，杜家纬，胡萃，李连昌，1999. 环境温度和光周期对枣镰翅小卷蛾求偶活动及性信息素释放的影响. 林业科学，35(2): 75 – 81]

Hao XY, Shi AX, Zhang JF, 2006. Preliminary study on biological characteristic and control of Cossidae. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, (5): 55 – 56. [郝小燕，石爱霞，张剑峰，2006. 木蠹蛾生物学特性及防治. 内蒙古农业科技，(5): 55 – 56]

Li B, Zhong LJ, Zhang XM, 2005. Biological characteristics of *Holcocerus vicarius* and its control. *Jilin Forest Science and Technology*, 34(2): 24 – 25. [李冰，钟利军，张秀梅，2005. 柳乌蠹蛾的生物学特性及防治. 吉林林业科技，34(2): 24 – 25]

Lu PF, Qiao HL, Wang XP, Zhou XM, Wang XQ, Lei CL, 2007. Adult behavior and circadian rhythm of sex pheromone production and release of the legume pod borer *Maruca vitrata* (Fabricius) (Lepidoptera: Pyralidae). *Acta Entomologica Sinica*, 50(4): 335 – 342. [陆鹏飞，乔海莉，王小平，周兴苗，汪细桥，雷朝亮，2007. 豆野螟成虫行为学特征及性信息素产生与释放节律. 昆虫学报，50(4): 335 – 342]

Managing Office of Preventing Exotic Forest Pests of the National Forestry Bureau, 2008. List of Hazardous Forestry Pests. http://www.forestry.gov.cn, 2008-4-7. [国家林业局防止外来林业有害生物管理办公室，2008. 林业危险性有害生物名单. http://www.forestry.gov.cn, 2008-4-7]

Mazor M, Dunkelblum E, 2005. Circadian rhythms of sexual behavior and pheromone titers of two closely related moth species *Autographa gamma* and *Cornutiplusia circumflexa*. *J. Chem. Ecol.*, 31(9): 2153 – 2168.

Snir R, Dunkelblum E, Gothilf S, Harpaz I, 1986. Sexual behavior and pheromone titre in the tomato looper, *Plusia chalcites* (Esp.) (Lepidoptera: Noctuidae). *J. Insect Physiol.*, 32: 735 – 739.

Swier SR, Rings RW, Musick GJ, 1977. Age-related calling behavior of the black cutworm, *Agrotis ipsilon*. *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 70: 919 – 924.

Wang XW, Liu MY, 1997. Periodicity of calling behavior and variation of sex pheromone titer in the gland of the oriental armyworm *Mythimna separata* Walker. *Acta Entomologica Sinica*, 40(4): 428 – 431. [汪新文，刘孟英，1997. 粘虫雌蛾求偶周期和性信息素含量变化规律. 昆虫学报，40(4): 428 – 431]

Webster RP, Carde RT, 1982. Relationships among pheromone titre,

calling and age in the omnivorous leafroller moth *Platynota stultana*. *J. Insect Physiol.*, 28: 925 – 933.

Xiao GR, 1992. Forest Insects of China. China Forestry Press, Beijing. 765. [萧刚柔, 1992. 中国森林昆虫. 北京: 中国林业出版社. 765]

Zarbin PHG, Lorini LM, Ambrogi BG, Vidal DM, Lima ER, 2007. Sex pheromone of *Lonomia obliqua*: daily rhythm of production, identification, and synthesis. *J. Chem. Ecol.*, 33: 555 – 565.

Zhang JT, Meng XZ, 2000. Electrophysiological responses of *Holcocerus insularis* Staudinger to the female sex pheromone extracts and standard compounds. *Scientia Silvae Sinicae*, 36(5): 123 – 126. [张金桐, 孟宪佐, 2000. 小木蠹蛾雄蛾对雌蛾性信息素提取物及合成标准化合物的电生理反应. 林业科学, 36(5): 123 – 126]

Zhang JT, Meng XZ, 2001. Sexual behavior of *Holcocerus insularis* and circadian rhythm of its sex pheromone production and release. *Acta Entomologica Sinica*, 44(4): 428 – 432. [张金桐, 孟宪佐, 2001. 小木蠹蛾性行为和性信息素产生与释放的时辰节律. 昆虫学报, 44(4): 428 – 432]

Zong SX, Luo YQ, Lu CK, Xu ZC, Zhang LS, 2006. Preliminary study on biological characteristic of *Holcocerus hippophaecolus*. *Scientia Silvae Sinicae*, 42(1): 79 – 84. [宗世祥, 骆有庆, 路常宽, 许志春, 张连生, 2006. 沙棘木蠹蛾生物学特性的初步研究. 林业科学, 42(1): 79 – 84]

(责任编辑: 袁德成)